



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú

Área  
Vulcanología

# INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ



**Observatorio Vulcanológico de Sur**

## INFORME TÉCNICO

### ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI (MOQUEGUA)

### PERIODO 2016

PRESENTADO POR:

**Ing. John Edward Cruz Igme**

FECHA: DICIEMBRE 2016



# INDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>3</b>
1.1 Ubicación	3
1.2 Contexto geomorfológico y estructural	4
1.3 Objetivos	4
<b>2. ANÁLISIS DE SEÑALES SISMO-VOLCANICAS</b>	<b>5</b>
2.1 Espectro de frecuencias	5
2.2 Análisis de tiempo –frecuencia (espectrograma)	5
<b>3. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS</b>	<b>6</b>
3.1 Red sísmica	6
3.2 Características de las estaciones e instrumentos utilizados	8
<b>4. ACTIVIDAD SÍSMICA</b>	<b>10</b>
4.1 Sismos de fractura	11
4.2 Sismos de baja frecuencia	12
4.3 Eventos tipo Tremor	12
4.4 Eventos tipo Híbrido	14
4.5 Análisis estadístico	14
<b>5. LOCALIZACIÓN DE EVENTOS</b>	<b>17</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>19</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>20</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>21</b>



## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Mapa de Ubicación. El Ticsani se encuentra en el departamento de Moquegua, sur del Perú. En el mapa de Moquegua, el triángulo rojo señala la ubicación del volcán Ticsani.</i> .....	3
<i>Figura 1.2 A: Caldera de destrucción, domos D1, D2 y D3 del volcán Ticsani. B: Estructuras locales de la región del volcán Ticsani (Lavallé et al., 2009).</i> .....	4
<i>Figura 2.1 Representación de una señal <math>x(t)</math> bajo la forma de la suma de sus componentes de distintas frecuencias.</i> .....	5
<i>Figura 2.2 Análisis tiempo-frecuencia</i> .....	6
<i>Figura 3.1 Distribución de estaciones sísmicas en la región del volcán Ticsani. Se observan los domos D1, D2 y D3 (recuadro de la esquina superior derecha). El recuadro de la esquina inferior izquierda muestra el enlace de telemetría hasta el OVS.</i> .....	7
<i>Figura 3.2.- Diagrama de funcionamiento de la red Ticsani con envío de datos por telemetría, para el año 2016. Barras verdes=funcionamiento correcto. Barras rojas=sin datos.</i> .....	8
<i>Figura 3.3 Sismómetro de banda ancha Trillium Compact Nanometrics 120s.</i> .....	9
<i>Figura 3.4 Registrador REFTEK 130S -01/03.</i> .....	10
<i>Figura 4.1 Proporción de sismos clasificados el año 2016 mediante la estación TCNI.</i> .....	10
<i>Figura 4.2 Ejemplo de registro de sismo de tipo VTp en el volcán Ticsani, evento registrado el 17/06/2016 05:12:37 UTC en la estación TCNI, componente Z. Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico.</i> .....	11
<i>Figura 4.3 Ejemplo de sismo de fractura distal (VTD) en el volcán Ticsani. El evento fue registrado el 11/07/2016 22:01:09 UTC en la estación TCNI, componente Z. Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico.</i> .....	12
<i>Figura 4.4 Ejemplo de sismo de baja frecuencia ó LP registrado por la estación TCNI el 16 de enero a las 19:37hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.</i> .....	13
<i>Figura 4.5 Ejemplo de registro de sismo tipo Tremor en el volcán Ticsani. Evento registrado el 29/12/2016 12:21:31 UTC en la estación TCNI, componente Z.). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.</i> .....	13
<i>Figura 4.6 Ejemplo de registro de sismo tipo Híbrido registrado en el volcán Ticsani (est. TCNI) el 10/02/2016 22:14 UTC, componente Z.). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.</i> .....	14
<i>Figura 4.7 Estadística de los eventos registrados por la estación TCNI, periodo 2016.</i> .....	16
<i>Figura 4.8 Sismograma de la estación sísmica TCNI, que muestra la importante actividad sísmica VTp registrada en la zona del volcán Ticsani los días 08 y 09 de marzo de 2016. Estos eventos constituyen un enjambre sísmico.</i> .....	17
<i>Figura 5.1 Distribución en superficie y profundidad de sismos VTp y VTD registrados en la región del Volcán Ticsani, periodo 2016. Se observan tres agrupaciones: A, B y C.</i> .....	18



## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1 Ubicación de las estaciones en coordenadas geográficas y UTM. ....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 3.2 Características de las estaciones sísmicas .....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 3.3 Características de los sismómetros Trillium Compact PH.....</i>	<i>9</i>



## RESUMEN

El Volcán Ticsani cuenta con una moderna red telemétrica completamente implementada a fines de 2015, el análisis de datos sísmicos corresponde al año 2016 y los datos procesados provienen en su integridad de esta nueva red.

En el volcán Ticsani ( $16^{\circ}45'3''S$ ,  $70^{\circ}36'1''O$  5133msnm) se observa sismos de tipo VT, LP, híbridos y tremor, pero sobresale largamente una intensa actividad sísmica de tipo VT o actividad relacionada a fracturas de rocas, tanto proximales como distales (98 % del total). Una característica es que los VT ocurren en forma de enjambres sísmicos habiéndose identificado hasta 31 enjambres con duraciones que alcanzan a 24 horas. Por otra parte, un aspecto importante y característico de los sismos Híbridos que se han registrado en el Ticsani es su notoria baja frecuencia ( $<1$  Hz) y energía suficiente para ser captados por redes más allá de la red Ticsani. Así por ejemplo, un sismo Híbrido que ha destacado en este periodo fue aquel ocurrido el 10 de febrero 22:14 UTC con 22 MJ de energía y que fue registrado hasta por la red del volcán Sabancaya distante a 170 km.

Durante el año 2016 se determinaron parámetros hipocentrales para 5482 sismos VT, con rangos de error menores a 1.5 km. En la distribución espacial se puede distinguir tres agrupaciones, donde una de ellas se ubica próxima al volcán Ticsani. El sismo VT más energético alcanzó una magnitud de 4.4 ML y fue percibido por poblaciones aledañas en esta región.



## INTRODUCCIÓN

El estrato volcán Ticsani es un volcán activo ( $16^{\circ}45'3''S$ ,  $70^{\circ}36'1''O$  5133msnm) situado en la Zona Volcánica Central de los Andes, a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua. Es considerado parte del grupo volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani (Lavallée et al., 2009), y está compuesto por un complejo de domos de lavas andesíticas a dacíticas y una caldera de destrucción. La más reciente erupción del volcán Ticsani ocurrió hace menos de 400 años (Siebert et al., 2010), con un IEV entre 2 y 3 de tipo freatomagmática (Mariño y Thouret, 2003); actualmente existen fumarolas de manera restringida.

La región del volcán Ticsani ha presentado en las últimas décadas una actividad sísmica importante asociada a la tectónica local (Aguilar et al., 1999; Tavera, 2006). Ante esta remarcable actividad, el Observatorio Vulcanológico del Sur del Instituto Geofísico del Perú (OVS - IGP) decidió iniciar su monitoreo continuo, primero mediante una red de estaciones sísmicas temporales que operó desde mayo 2014. A partir de agosto de 2015 el OVS-IGP dispone de datos sísmicos en tiempo real gracias a la puesta en operación de una red sísmica telemétrica Ticsani. La red está constituida por cuatro estaciones (TCN1, SPDR, MUYQ y HYTR) e implementada con equipos de última generación.

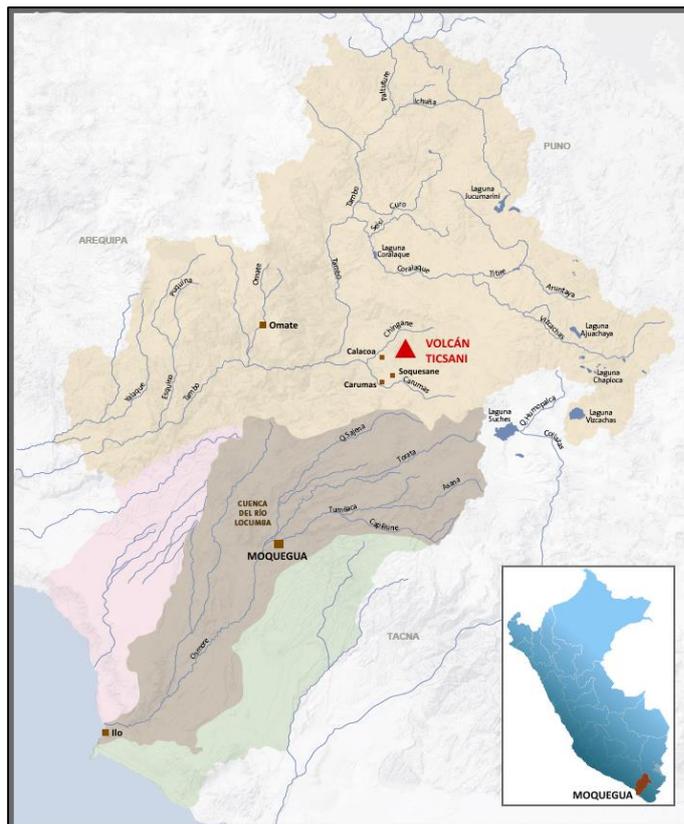
El presente informe técnico se describe la actividad sísmica del volcán Ticsani mediante el procesamiento y análisis de datos sísmicos, los resultados obtenidos dan cuenta de su actividad sísmica durante el año 2016.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Ubicación

Este edificio volcánico se ubica en el segmento sur de la cordillera occidental de los Andes peruanos. Sus coordenadas son: 16°45' de Latitud Sur y 70° 36' de Longitud Oeste. La ciudad más importante de la región es Moquegua, la cual se encuentra a una distancia de 60 km al SO del Ticsani. (*figura. 1.1*)

Políticamente, este volcán pertenece a la jurisdicción del distrito de San Cristóbal, provincia de Mariscal Nieto del departamento de Moquegua. Entre los centros poblados más importantes de la zona, se encuentran en el flanco oeste del volcán Ticsani y dentro de un radio de 11 km se encuentran los centros de Soquezane, Quebaya, Calacoa, San Cristobal, Carumas y Cambrune, siendo Soquezane el más cercano a 7.5km del domo reciente.

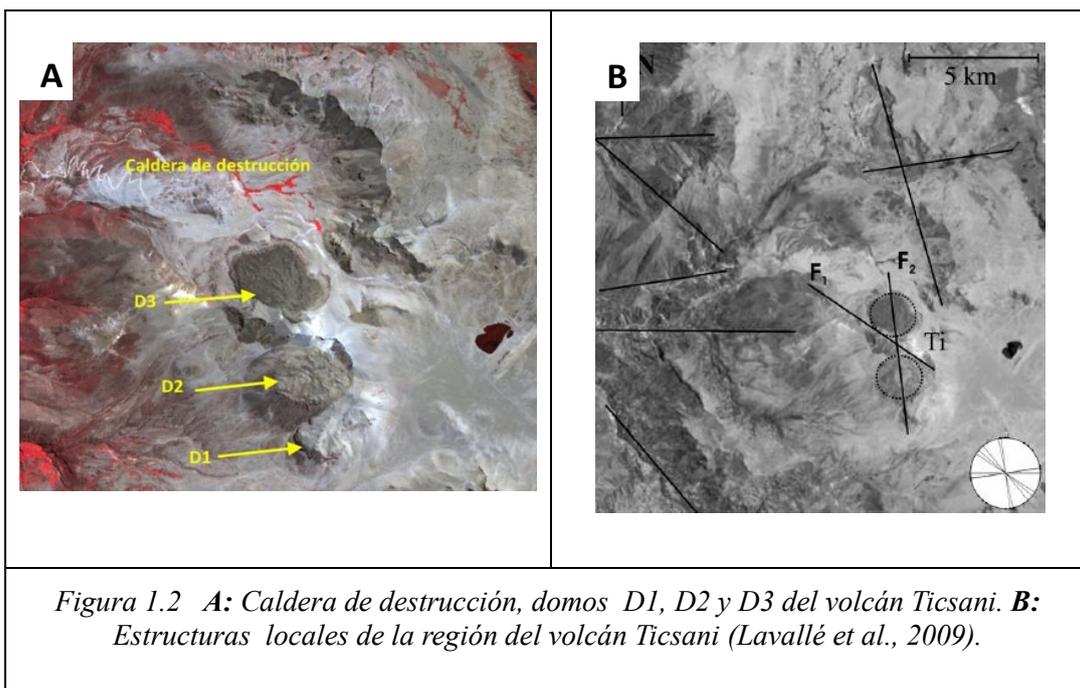


*Figura 1.1 Mapa de Ubicación. El Ticsani se encuentra en el departamento de Moquegua, sur del Perú. En el mapa de Moquegua, el triángulo rojo señala la ubicación del volcán Ticsani.*

## 1.2 Contexto geomorfológico y estructural

Las características geomorfológicas de este macizo son propias de la puna o altiplanicie de la cordillera occidental, presentando pendientes fuertes, áreas de flujos de lavas y de avalanchas de escombros. El volcán Ticsani está conformado estructuras volcánicas de destrucción como la caldera de avalancha, cráteres y el afloramiento de tres domos denominados D1, D2 y D3 (domo reciente), cuya característica es que se encuentran alineados de Norte a Sur (*figura 1.2A*)

Los esfuerzos predominantes para la región del volcán Ticsani están caracterizados por fallas NW-SE, N-S. La zona presenta escarpas de fallas con dirección N-S visibles desde el NE como es el caso de la falla F2 (*figura 1.2B*). Se encuentran también fallas antiguas con orientación NO-SE al oeste del volcán Ticsani (Lavallé et al., 2009).



## 1.3 Objetivos

- ✓ Identificar y clasificar el tipo las señales que caracterizan a la actividad sismo-volcánica que se produce en la región del volcán Ticsani, mediante el análisis espectral y formas de ondas.

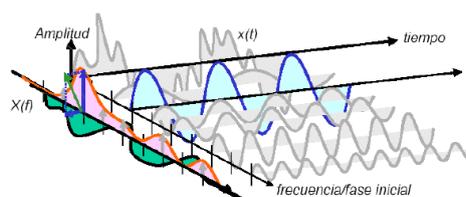
- ✓ Describir y detallar la actividad sísmica del volcán durante el año 2016
- ✓ Determinar la distribución de sismos en superficie y en profundidad. Elaborar un mapa de sismicidad así como perfiles sísmicos.

## 2. ANÁLISIS DE SEÑALES SISMO-VOLCÁNICAS

En esta sección se revisa algunas técnicas básicas para el análisis de una señal sísmica. Las señales que se procesan son digitales, por tanto el análisis de datos sísmicos no se limita al estudio de la forma de onda, sino que puede incidir en la identificación de sus características espectrales. Y esta facilidad es sumamente importante para identificar los tipos de fuentes sísmicas que, en ambientes volcánicos, son diversos.

### 2.1 Espectro de frecuencias

Analizar una señal mediante su espectro de frecuencias se ha convertido en una herramienta muy importante al momento de caracterizar eventos sísmicos. Dentro de las diferentes técnicas para el cálculo de la amplitud espectral la transformada de Fourier es la herramienta más utilizada debido a su eficacia al momento del procesamiento. En principio una señal expresada en el dominio de tiempo puede expresarse como la suma discreta o continua de sinusoides de distintas frecuencias, quedando determinada como un conjunto discreto o continuo, que forma el espectro de frecuencia de la señal representada en el dominio de frecuencias (*figura 2.1*).



*Figura 2.1 Representación de una señal  $x(t)$  bajo la forma de la suma de sus componentes de distintas frecuencias*

### 2.2 Análisis de tiempo –frecuencia (espectrograma)

El contenido espectral no es constante en el tiempo, el espectrograma permite presentar el espectro de frecuencias de la señal a lo largo del tiempo. Las distribuciones de tiempo frecuencia mapean una señal unidimensional (tiempo) en forma bidimensional (tiempo-frecuencia). El principio del espectrograma es dividir la señal en segmentos que se

recubren parcialmente, para cada uno de estos segmentos se calcula la Transformada de Fourier, el espectro resultante corresponde entonces al tiempo del centro de la ventana y se representa bajo un código de colores. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de una distribución de tiempo-frecuencia. La función matemática que se emplea en el espectrograma es conocida como la transformada de Fourier de Corto plazo (TFCP).

El alto contenido de frecuencia nos indica que la señal depende de varios factores entre los que están el arribo de las diferentes fases sísmicas (P, S, superficiales), la intensidad del movimiento del suelo, la magnitud del sismo, los efectos de fuente, la propagación de la señal y las condiciones i/o geometrías del suelo, entre otros.

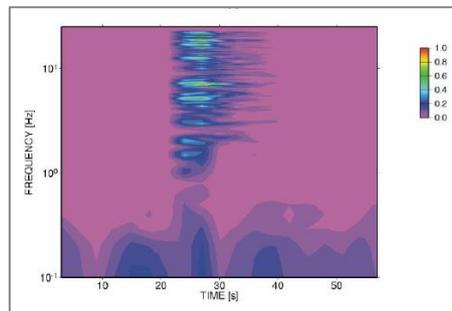


Figura 2.2 Análisis tiempo-frecuencia

### 3. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

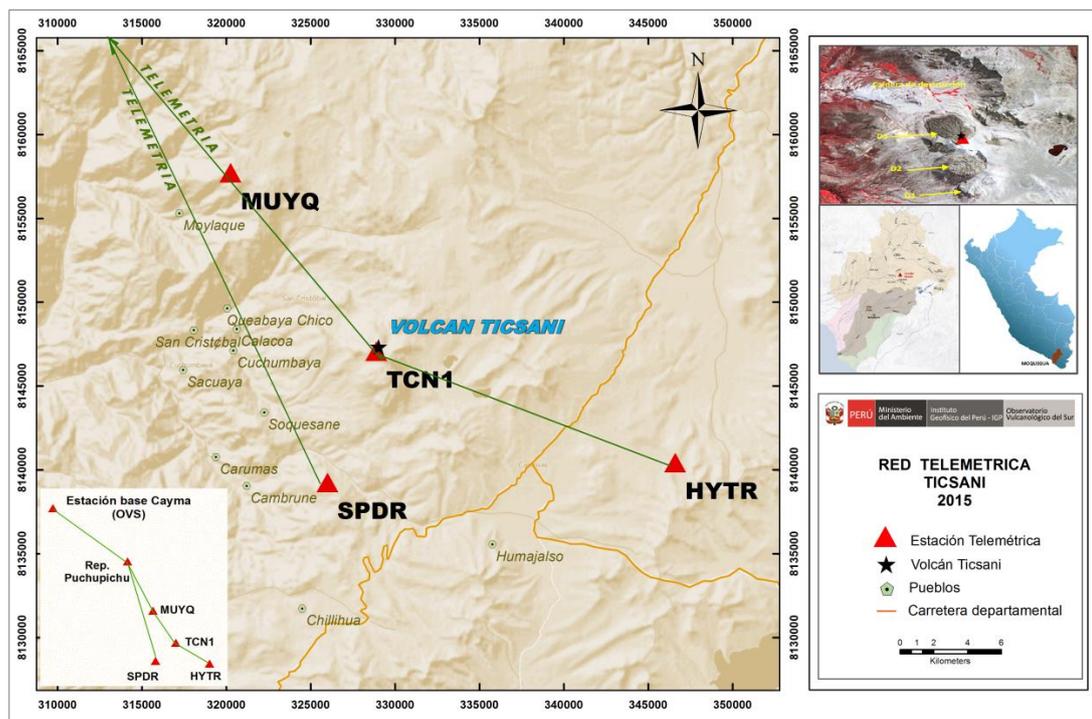
#### 3.1 Red sísmica

El OVS – IGP recibe datos de la estación TCN1 a partir de la nueva red Telemétrica Ticsani desde agosto de 2015; posteriormente, en diciembre de este mismo año se adicionan otras tres estaciones (MUYQ, SPDR y HYTR ) a la red. De este modo el volcán Ticsani cuenta con un moderno y nuevo sistema de monitoreo sísmico en tiempo real (*figura 3.1*).

La estación TCN1 se encuentra sobre el domo reciente del Ticsani, y es considerada como la estación de referencia para la clasificación de eventos sísmicos; por consiguiente toda la información que resume y se publica sobre este volcán considera de manera prioritaria a los datos provenientes de esta estación. Gracias a su proximidad a la(s) fuente(s) relacionadas al paso de fluidos la estación TCN1 permite discriminar las señales que se registran en las demás estaciones.

Las estaciones SPD, MUYQ y HYTR se encuentran a 9 km, 13 km y 20km del Ticsani respectivamente. En conjunto las cuatro estaciones de la red Ticsani permiten el cálculo de los parámetros hipocentrales ya que conforman una buena cobertura azimutal en la región. Las características en cuanto a ubicación, código y altura de las estaciones se detallan en la *tabla 3.1*.

Las estaciones han funcionado relativamente bien en 2016. La estación TCN1 fue la que menos interrupciones presentó a diferencia de la estación HYTR, la cual presentó cortes los meses de junio, julio y agosto (*figura 3.2*). La estación HYTR sufrió la pérdida de sus componentes debido a vandalismo. Todos cortes observado en la *figura 3.2* fueron oportunamente reportados como incidencias en la dirección web (<http://intranet.igp.gob.pe/registro-ovs/index.php>.) establecida para ello por la SRG del IGP.



*Figura 3.1 Distribución de estaciones sísmicas en la región del volcán Ticsani. Se observan los domos D1, D2 y D3 (recuadro de la esquina superior derecha). El recuadro de la esquina inferior izquierda muestra el enlace de telemetría hasta el OVS.*



RED TICSANI 2016 Coordenadas (Datum WGS-84 Zona 19k)						
Estación	Código	Latitud	Longitud	Este UTM	Norte UTM	Altura (m.s.n.m.)
Ticsani	TCN1	-16.7530	-70.6052	328894.05	8147077.99	5132
Muylaque	MUYQ	-16.6563	-70.6854	320259.00	8157711.03	4584
San Pedro	SPDR	-16.8235	-70.6330	325999.02	8139251.99	4395
Huaytire	HYTR	-16.8142	-70.4396	346597.00	8140437.02	4703

Tabla 3.1 Ubicación de las estaciones en coordenadas geográficas y UTM.

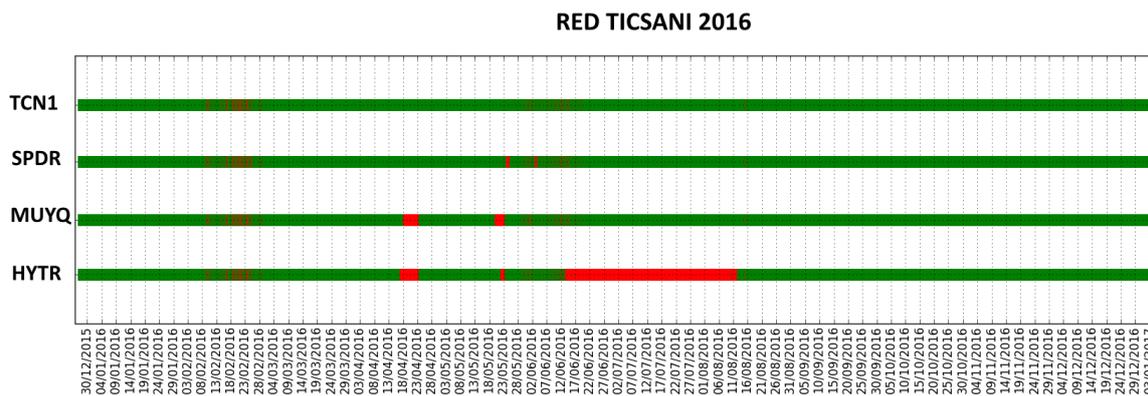


Figura 3.2.- Diagrama de funcionamiento de la red Ticsani con envío de datos por telemetría, para el año 2016. Barras verdes=funcionamiento correcto. Barras rojas=sin datos.

### 3.2 Características de las estaciones e instrumentos utilizados

La red telemétrica del volcán Ticsani cuenta con un sismómetro de banda ancha Trillium Compact PH Nanometrics (figura 3.3) y un registrador REFTEK (figura 3.4) 130S-01/3. Los modelos y series así como su respuesta instrumental se encuentran en la tabla 3.2.

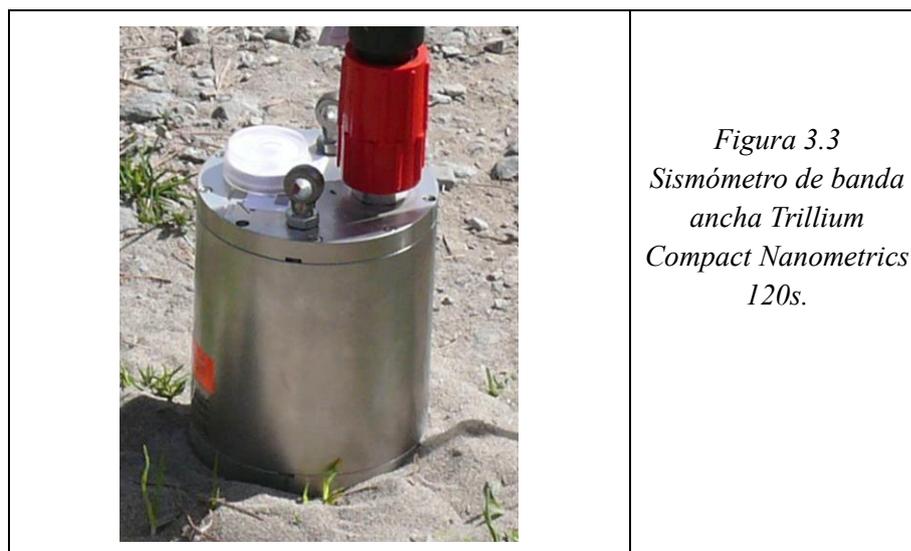
Código	Sismómetro				Digitalizador			Resp. Instr.
	Marca	Modelo	Serie	Tipo	Marca	Modelo	Serie	
TCN1	Trillium Nanometrics	TRCP120	2830	Banda Ancha	REFTEK	130S-01/3	BD12	0.003611
MUYQ	Trillium Nanometrics	TRCP120	2816	Banda Ancha	REFTEK	130S-01/3	BAFE	0.003611
SPDR	Trillium Nanometrics	TRCP120	2825	Banda Ancha	REFTEK	130S-01/3	BD41	0.003611
HYTR	Trillium Nanometrics	TRCP120	2829	Banda Ancha	REFTEK	130S-01/3	BDB4	0.003611

*Tabla 3.2 Características de las estaciones sísmicas*

Los sismómetros Trillium Compact son altamente sensibles, idóneos para la vigilancia volcánica. A continuación las características de este equipo (*Tabla 3.3*):

Sensitivity - 120s	750V-s/m nominal $\pm 0.5\%$ precision
Bandwidth - 120s	-3 dB points at 120 s and 100 Hz
Off-axis sensitivity	$\pm 0.5\%$
Transfer function	Lower corner pole frequency within $\pm 0.5\%$ of nominal provided High-frequency poles within 1 dB of nominal up to 45 Hz No peak in response at high frequency
Clip level	26 mm/s from 0.1 Hz to 10 Hz
Operational tilt range - 120s	$\pm 2.5^\circ$
Parasitic resonance	None below 200 Hz
Dynamic range	>152 dB @ 1 Hz

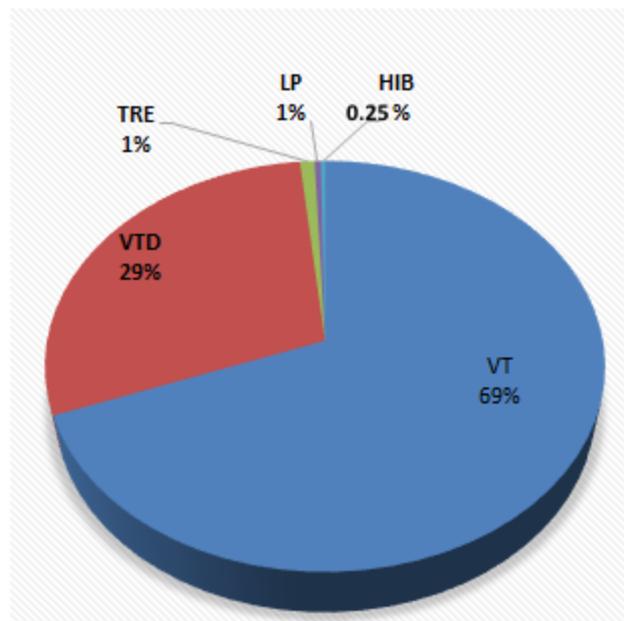
*Tabla 3.3 Características de los sismómetros Trillium Compact PH.*





#### 4. ACTIVIDAD SÍSMICA

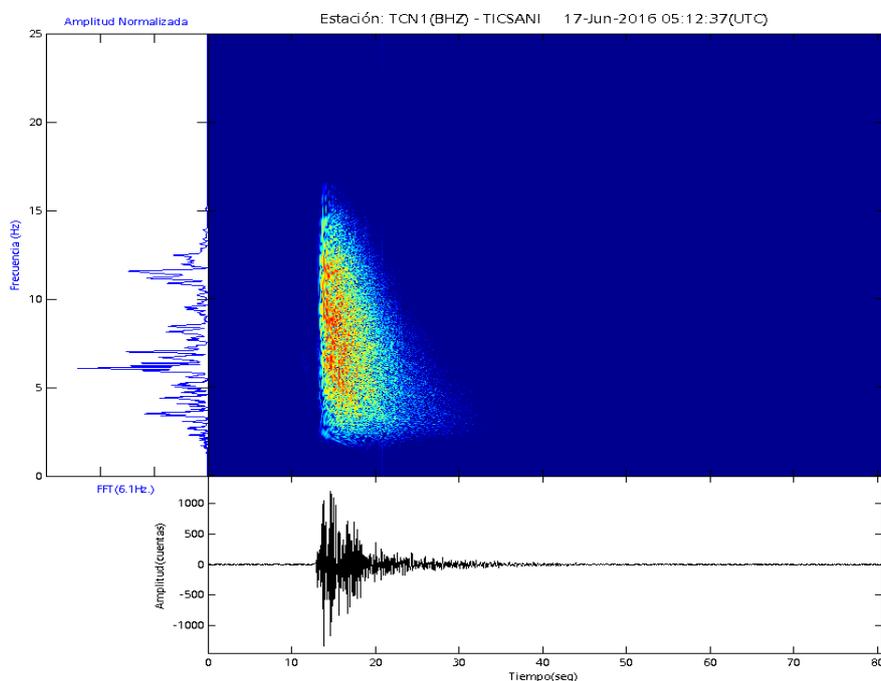
Durante el año 2016 se registró un total 33888 sismos. De ellos, 23462 eventos son sismos de fractura proximales (69%), 9875 son sismos de fractura distales (29 %). Se consideran distales a los sismos distales situados a distancias mayores a los 5km respecto al cráter. También se registraron 323 sismos tipo Tremor (1%), 141sismos LP relacionados al paso de fluidos (1%) y 87 sismos tipo híbrido (0.25 %). Como ya hemos mencionado líneas arriba, la clasificación se hizo tomando muy en cuenta los registros de la estación de referencia TCN1 (*figura 4.1*).



*Figura 4.1 Proporción de sismos clasificados el año 2016 mediante la estación TCN1.*

#### 4.1 Sismos de fractura

En 2016, los eventos VT proximales (ó VTp), es decir aquellos situados a distancias menores a 5 km del cráter, representaron la sismicidad dominante. Cabe recordar que este comportamiento similar ocurrió también en los años 2015 y 2014. Estos sismos VTp son caracterizados por ser de tipo impulsivo, presentando en la mayoría de casos arribos claros de fases P y S; el valor promedio en su duración fue de 23 s. En el espectro de frecuencias se presenta una amplia banda con frecuencias desde 2Hz hasta los 16 Hz. Cabe destacar, sin embargo, que hemos observado que los sismos de fractura VTp en el Ticsani en general presentan el valor promedio de 6Hz como frecuencia dominante (*Figura 4.2*)



*Figura 4.2 Ejemplo de registro de sismo de tipo VTp en el volcán Ticsani, evento registrado el 17/06/2016 05:12:37 UTC en la estación TCN1, componente Z. Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico.*

También fueron observados sismos de fractura pero distales (sismos VTD), es decir situados a distancias mayores a 5km respecto al cráter. Ellos presentan fases P y S claramente distinguibles, una duración promedio de 35 s y frecuencias dominantes promedio de 5 Hz. Un ejemplo de este tipo de sismo se puede observar en la *figura 4.3*.

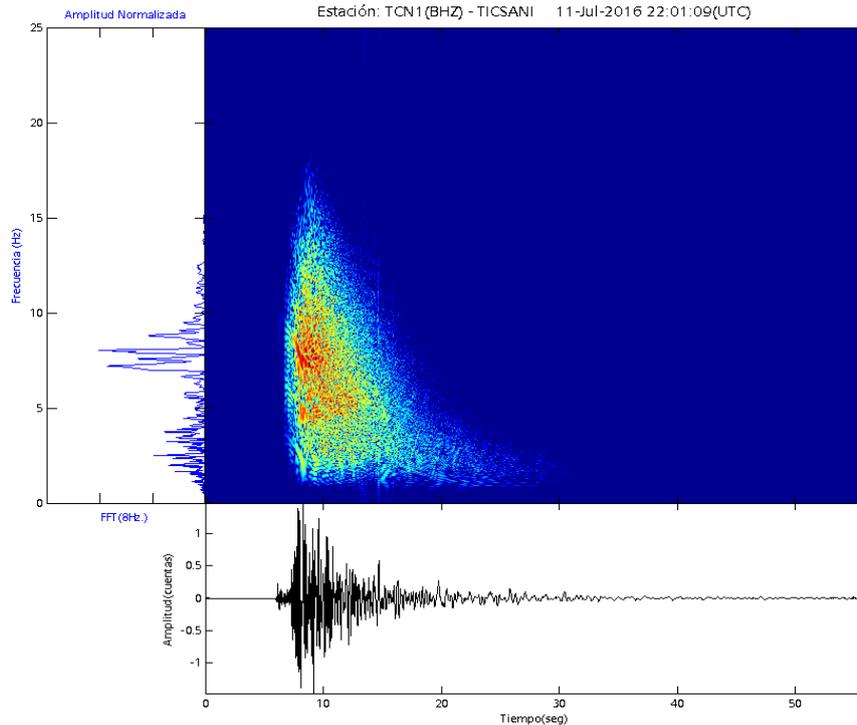


Figura 4.3 Ejemplo de sismo de fractura distal (VTD) en el volcán Ticsani. El evento fue registrado el 11/07/2016 22:01:09 UTC en la estación TCN1, componente Z. Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias característico.

## 4.2 Sismos de baja frecuencia

Los eventos de baja frecuencia ó LP representan el 1% del total de eventos clasificados. Por lo general las formas de onda son de tipo emergente con un decaimiento lento en su coda; no es posible observar el arribo de las ondas P y S, de modo que no son localizables. Los registros muestran una banda espectral reducida con pico promedio de 4.3 Hz.

En la figura 4.4 se muestra un ejemplo típico de un evento de baja frecuencia registrado en la estación TCN1 el día 16 de enero 2016, el espectrograma muestra mayor incidencia en las frecuencias por debajo de 5 Hz.

## 4.3 Eventos tipo Tremor

Los tremores registrados son de tipo espasmódico y de duración entre los 40 s y 148 s. Las frecuencias dominantes alcanzan picos promedio de 6 Hz y son poco energéticos (energías menor a 1 MJ). Un ejemplo de este tipo de sismo se observa en la figura 4.5.

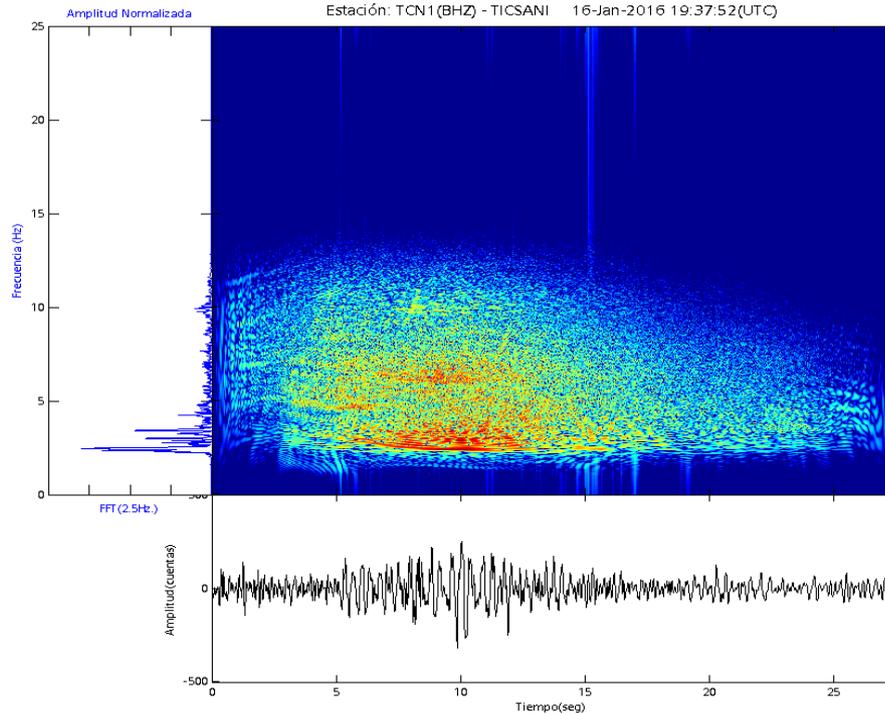


Figura 4.4 Ejemplo de sismo de baja frecuencia ó LP registrado por la estación TCN1 el 16 de enero a las 19:37hrs (UTC). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.

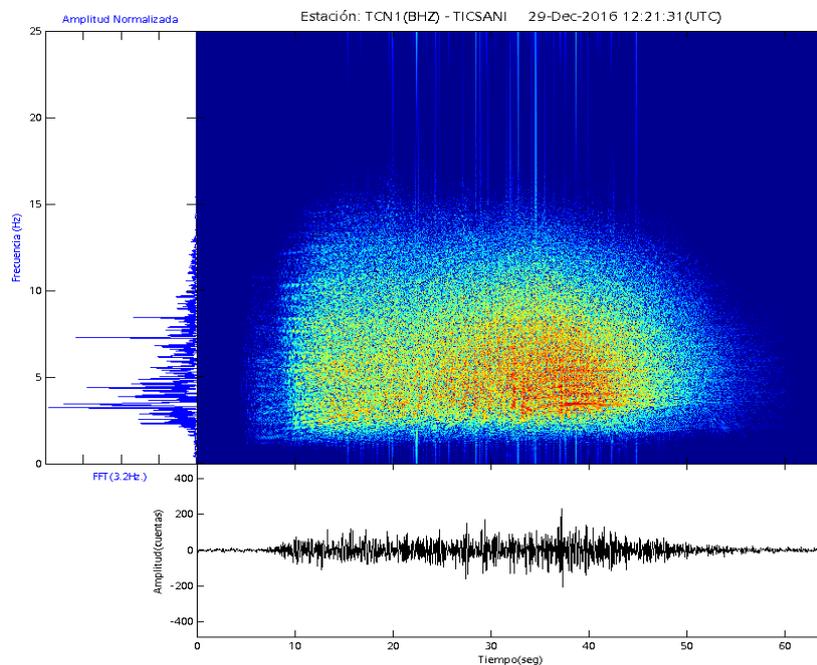
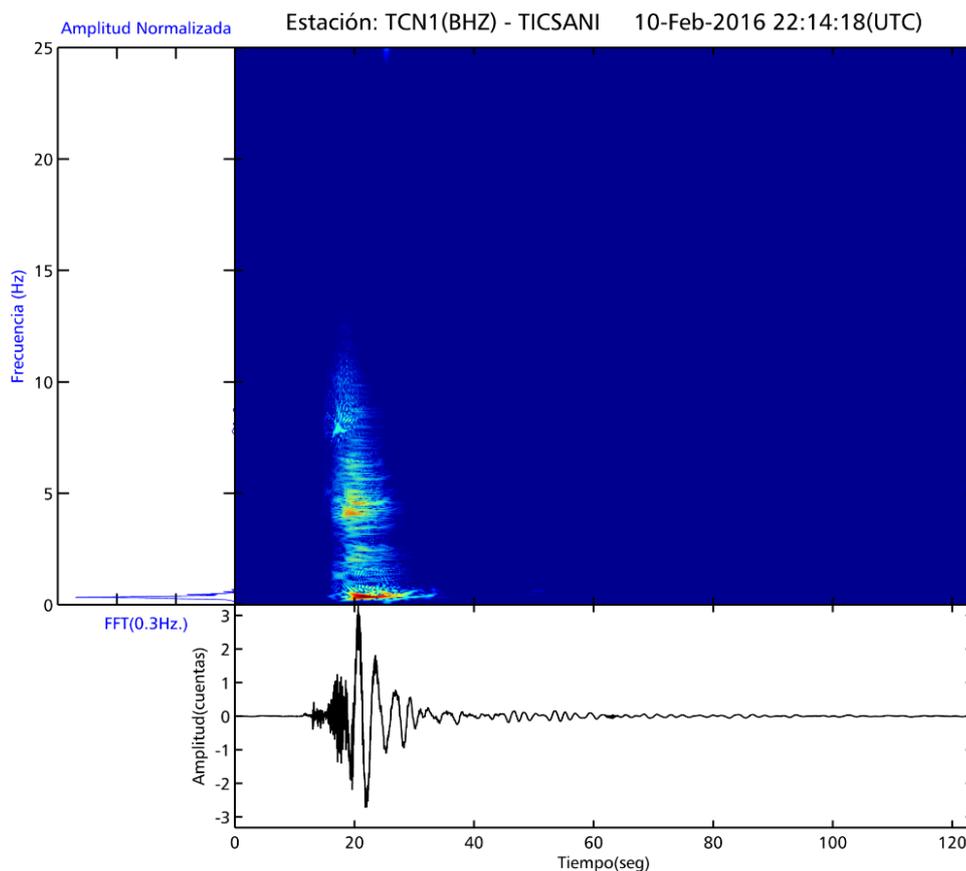


Figura 4.5 Ejemplo de registro de sismo tipo Tremor en el volcán Ticsani. Evento registrado el 29/12/2016 12:21:31 UTC en la estación TCN1, componente Z.). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.

#### 4.4 Eventos tipo Híbrido

En Ticsani se han registrado pocos pero muy claros sismos de tipo híbrido desde diciembre 2015. Asimismo, en 2016 se han registrado también algunos de ellos. Como característica importante de estos eventos es que muestran frecuencias dominantes muy bajas, próximas los 0.34Hz (*figura 4.6*). Sus altas frecuencias pueden alcanzar hasta los 8 Hz. Los Híbridos del volcán Ticsani tienen inicios emergentes, y en general son registrados por las cuatro estaciones de la red Ticsani.



*Figura 4.6 Ejemplo de registro de sismo tipo Híbrido registrado en el volcán Ticsani (est. TCN1) el 10/02/2016 22:14 UTC, componente Z.). Se muestra su forma de onda, espectrograma y espectro de frecuencias.*

#### 4.5 Análisis estadístico

Este análisis nos permite observar la evolución de la actividad. Para el caso de los sismos de fractura VTp, se observaron hasta tres picos sobresalientes de sismicidad los meses de enero y marzo. El día 30 de marzo fue el día con mayor número de eventos,



registrándose un enjambre sísmico de hasta 1251 sismos VTp, con Desplazamientos Reducidos (DR) de hasta 1800 cm<sup>2</sup> (*figura 4.7A*).

La ocurrencia de los sismos VTp se da principalmente en forma de enjambres sísmicos. En este periodo fueron observados hasta 31 enjambres sísmicos. Las duraciones de estos enjambres pueden ser importantes; es el caso del enjambre registrado el 9 de marzo (*figuras 4.7A y 4.8*) con más de 24 horas de duración. Los enjambres sísmicos son actividad que denota influencia de fluidos magmáticos en las proximidades a fallas tectónicas preestablecidas, y pueden ser indicios precursores de procesos eruptivos (White & McCausland, 2016).

Por su parte, el registro de los sismos de fractura distales VTD alcanzó un máximo el día 02 de junio, con 1211 sismos (*figura 4.7B*). Es importante mencionar que en la sismicidad VTD también se registró, aunque en pocas ocasiones, enjambres sísmicos.

Respecto a los sismos relacionados al paso de fluidos (LP) éstos fueron registrados en muy pocas ocasiones. Cabe mencionar, sin embargo, que sismos LP fueron observados en mayor número en los meses primeros meses del 2016. El día con mayor registro de LPs fue el 12 de enero con 11 sismos (*figura 4.7C*).

En cuanto a los eventos tipo Tremor, ellos tuvieron una mayor incidencia los meses de noviembre y diciembre con cierta tendencia al incremento. El 22 de noviembre se registró hasta 16 min de tremor (*figura 4.7D*).

Por su parte, los eventos tipo Híbrido (con bajas frecuencias que contienen frecuencias-pico menores a 1 Hz), ocurren esporádicamente, pero son notorios. El día 14 de enero se observaron hasta cinco eventos (*figura 4.7E*), siendo así el día con mayor número de eventos híbridos registrados en el año. El evento más energético de este tipo fue registrado el día 10 de febrero 22:14 UTC con 22 MJ de energía (*figura 4.6*), sismo que fue registrado hasta por la red del volcán Sabancaya distante a 170 km del Ticsani. Algunos de los eventos híbridos llegaron a ser localizados, como por ejemplo el evento del 10 de febrero que resultó estar ubicado por debajo del domo reciente del volcán Ticsani. Esta localización se realizó analizando las fases sísmicas P y S correspondientes a las altas frecuencias observadas. Este tipo de sismicidad indica movimiento de magma o fluidos a



profundidades relativamente importantes, pues la señal ha sido registrada en estaciones muy lejanas.

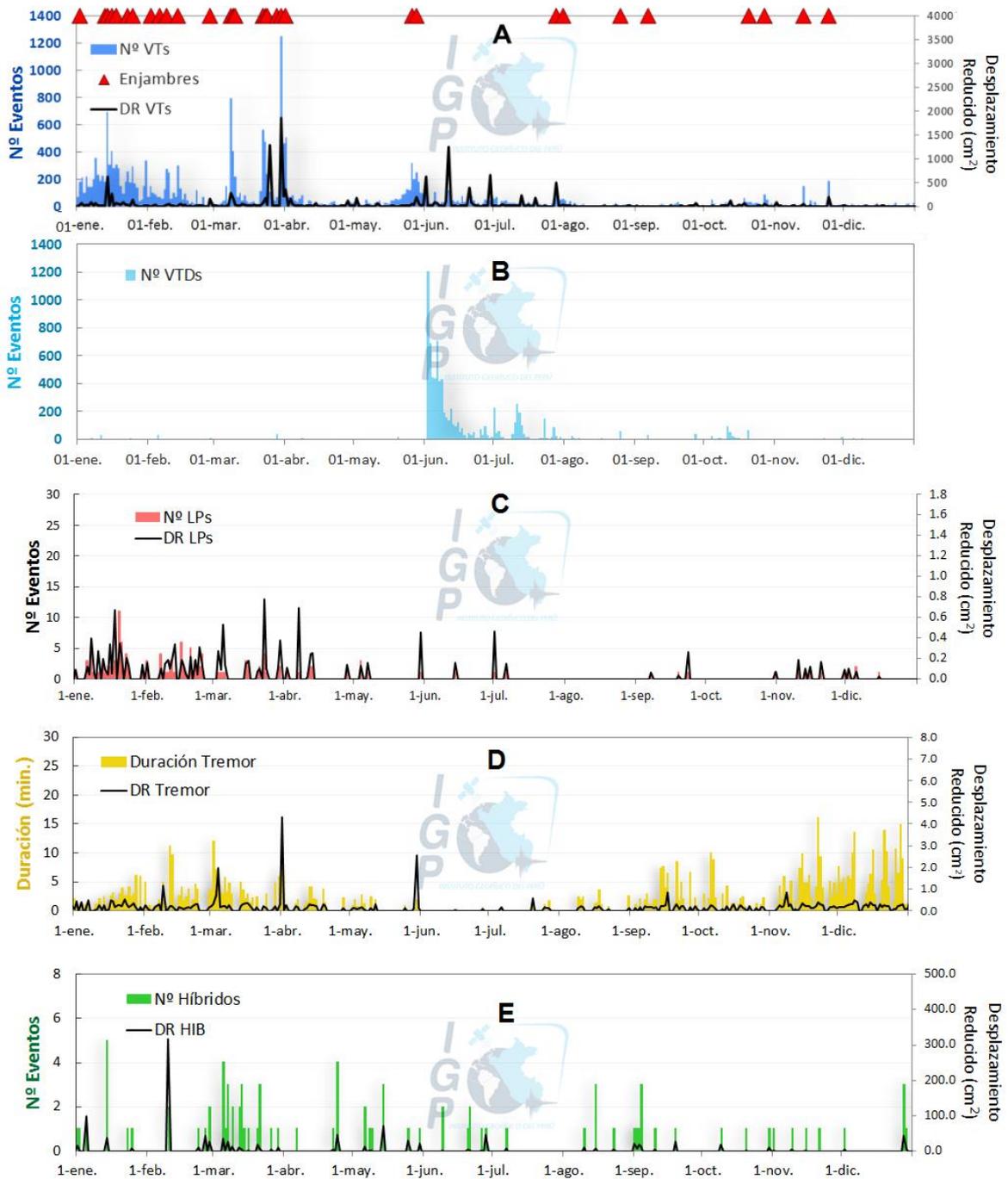
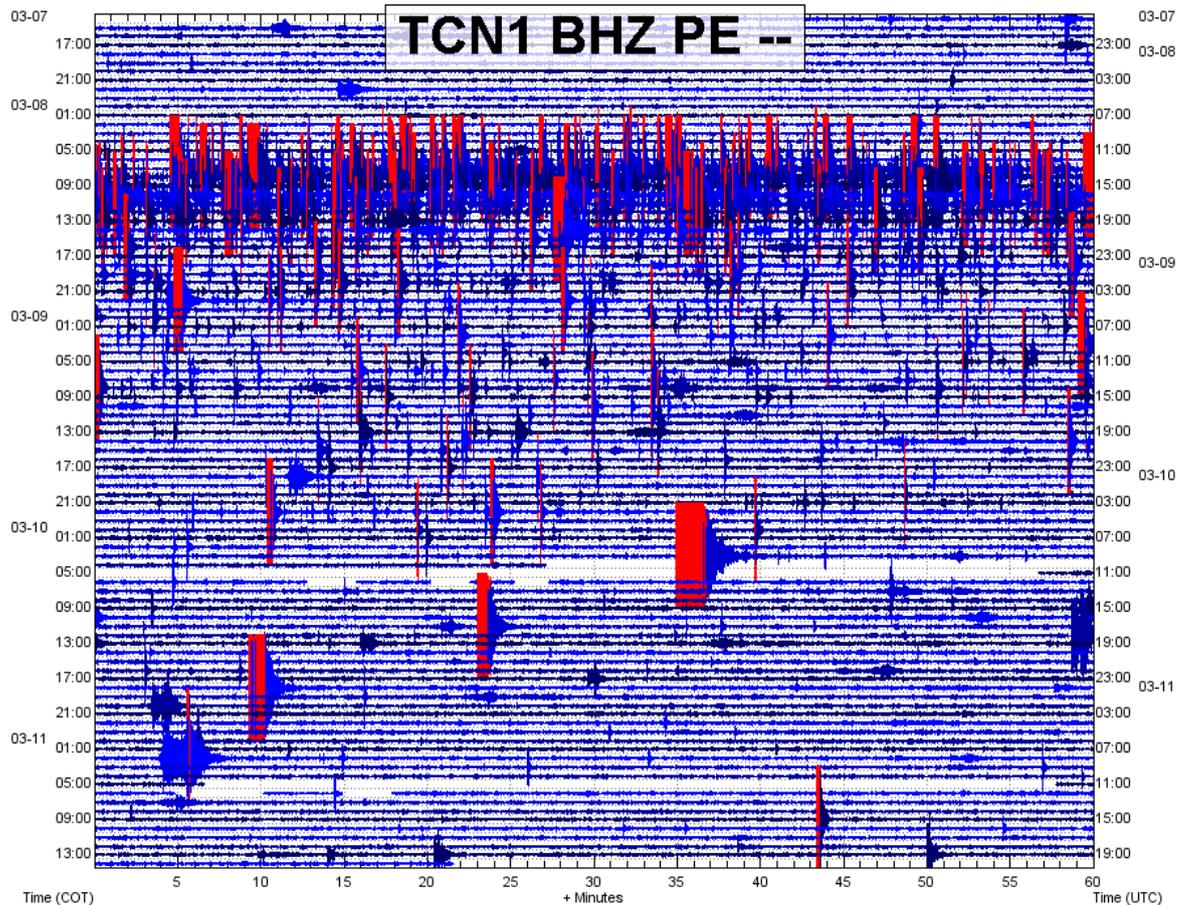


Figura 4.7 Estadística de los eventos registrados por la estación TCN1, periodo 2016.



*Figura 4.8 Sismograma de la estación sísmica TCN1, que muestra la importante actividad sísmica VTp registrada en la zona del volcán Ticsani los días 08 y 09 de marzo de 2016.*

*Estos eventos constituyen un enjambre sísmico.*

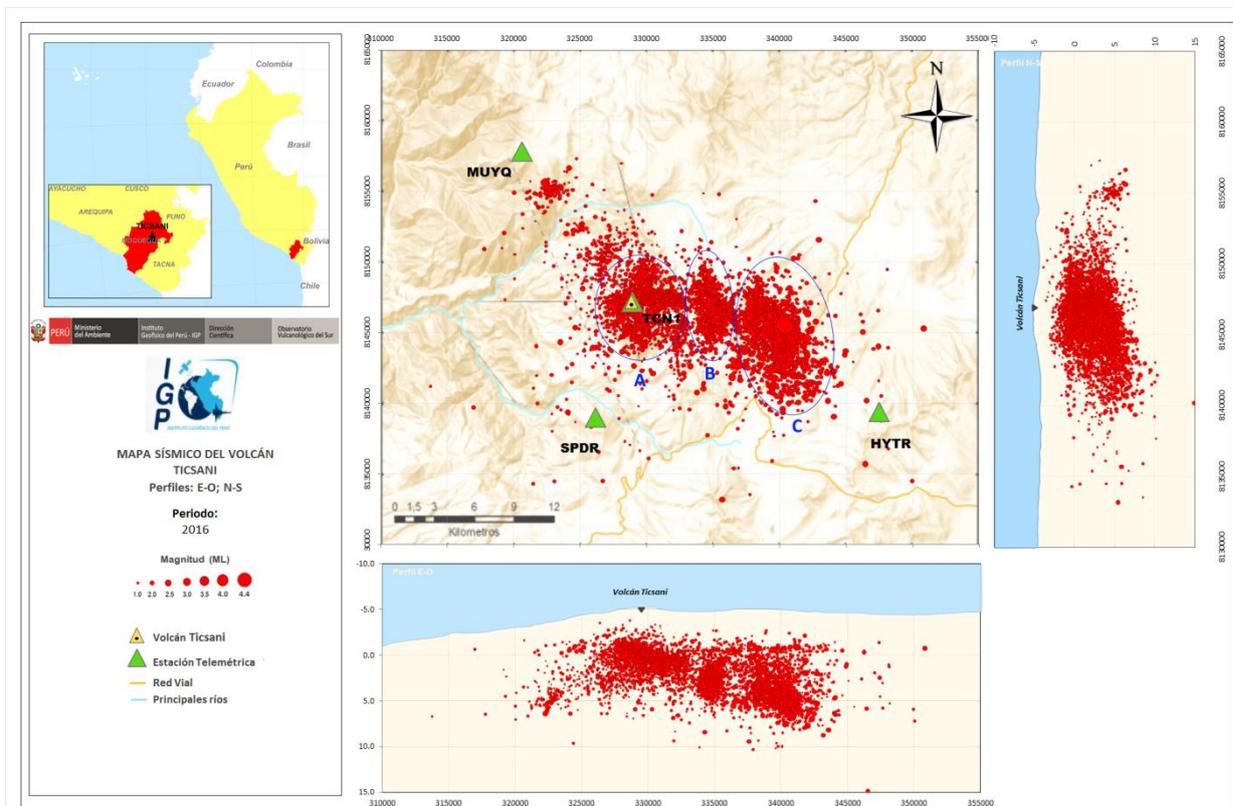
## 5. LOCALIZACIÓN DE EVENTOS

Para el cálculo de parámetros hipocentrales fue utilizado el programa Hypoellipse (Lahr, J. 1999) basado en Geiger (1912), cuyo principio radica en la minimización de las diferencias de los tiempos de llegada teóricos y los observados correspondientes a las fases registradas. Para una buena localización, es importante tener una clara lectura de las fases sísmicas P y S, del mismo modo es importante tener una apropiada cobertura azimutal.

En 2016, fueron localizados un total de 5482 sismos de fractura con errores en la horizontal y vertical menores a 1.5 km. Las magnitudes se encuentran entre 1 ML y 4.4 ML. El sismo más energético alcanzó una magnitud de 4.4 ML registrado el 01 de junio a 19:01 (Hora Local) y ubicado a 11km al E del volcán Ticsani, este evento fue percibido por

pobladores asentados en los distritos cercanos al volcán Ticsani (Intensidad IV) entre otros eventos de menor intensidad (*figura 5.1*).

El mapa de distribución de la sismicidad VT presenta tres agrupamientos: el primero (agrupamiento A) se concentra principalmente próximo al volcán Ticsani, el segundo (agrupamiento B) se concentra 6 km al Este del Ticsani, y el tercero (agrupamiento C) se concentra a 11 km al Este del volcán (*figura 5.1*). También, en los perfiles E-W y N-S (*figura 5.1*) se puede observar que los sismos alcanzan profundidades de hasta 16 km respecto al cráter.



*Figura 5.1* Distribución en superficie y profundidad de sismos VTp y VTD registrados en la región del Volcán Ticsani, periodo 2016. Se observan tres agrupamientos: A, B y C.



## CONCLUSIONES

Los datos analizados correspondientes al año 2016 provienen de la red telemétrica Ticsani, constituida por cuatro estaciones modernas de banda ancha dispuestos en buena cobertura azimutal teniendo como centro el Volcán Ticsani.

- La sismicidad dominante en la región del volcán Ticsani está representada por los sismos VTp (sismos de fractura, cercanos al crater) con el 69% del total de sismos clasificados. Esta importante actividad alcanzó un registro diario máximo de 1251 sismos VTp. También se registraron sismos VTD (sismos de fractura, distantes) que representaron el 29% de la sismicidad clasificada. La ocurrencia de esta sismicidad se da principalmente en forma de enjambres sísmicos.
- La ocurrencia de los sismos relacionados al paso de fluidos, tipo Tremor e Híbridos es esporádica y de poca energía, sin embargo el 10 de febrero a 22:14 UTC se observó un importante sismo tipo Híbrido con 22 MJ de energía, captado por las redes Ubinas, Misti y Sabancaya.
- Se determinaron parámetros hipocentrales para 5482 sismos relacionados a fractura de rocas proximales y distales. La sismicidad se agrupa en tres clúster principales: el primero próximo al volcán Ticsani, el segundo a 6 km al este del Ticsani y finalmente un tercer clúster a 11 km de este macizo. El sismo más importante en este periodo alcanzó los 4.4 ML, sismo sentido por las poblaciones aledañas en esta región.
- La información sísmica recabada da indicios que en este periodo ocurrieron aportes magmáticos que ascendieron de profundidades importantes no aun determinadas con precisión. Estos ascensos son evidenciados por los sismos Tipo Híbrido de muy bajas frecuencias y por la secuencia de enjambres que se ha estado registrando en repetidas oportunidades. El intento del magma de abrirse paso hacia el exterior habría provocado presión en el sistema y aporte de fluidos magmáticos en las inmediaciones y hacia los exteriores del aparato volcánico alcanzando fallas aledañas favoreciendo así la ocurrencia de sismos en enjambre.



## RECOMENDACIONES

- Complementar la red con al menos dos estaciones próximas al Volcán Ticsani, de modo que sea posible identificar plenamente las señales propias del volcán.
- Es necesario la instalación de sensores de registro continuo de temperatura muy próximos a los centros fumarólicos del volcán Ticsani, así como sensores de deformación.
- Realizar visitas periódicas al volcán Ticsani y realizar por lo menos dos campañas anuales del método geofísico de Potencial Espontaneo.
- Complementar los estudios sismológicos mediante la realización de una campaña de tomografía sísmica, esto ayudara a tener una idea somera de la ubicación de la cámara magmática y la delimitación del sistema hidrotermal.



## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, V., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., & Kosaka, R. (2001). *Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate - Moquegua) del 6 de Mayo de 1999 (MW=4.0)*. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* v. 91 (2001) p.69-80.
- Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide. *U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition*.
- Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., & Byrnes, J. (2009). *Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 186 (2009) 253–264.
- Mariño, J., & Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima*.
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the world. Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press, Berkeley*.
- Tavera, H. (2006). *Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua)*. Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- White R., & McCausland W. (2016). *Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 309 (2016) 139–155. Published by Elsevier B.V.
- Geiger L. (1912). *Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only*. *Bulletin of St. Louis University*, 8 (1), p. 56-71.